

## PENGARUH KOREKSI ATENUASI RADAR CUACA TERHADAP PERHITUNGAN ESTIMASI CURAH HUJAN DI JAWA TIMUR

### EFFECT OF WEATHER RADAR ATTENUATION CORRECTION ON RAIN ESTIMATION CALCULATIONS IN EAST JAVA

*Ahmad Kosasih, Hartono, dan Retnadi Heru Jatmiko*  
Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

Submitted:15-01-2020; Revised: 04-08-2021; Accepted: 31-05-2021

#### ABSTRACT

Rainfall estimation using band C weather radar creates uncertainty in the results of its estimation accuracy. The cause is meteorological and non-meteorological disturbances that affect the reflectivity raw data (dBz), one of which is attenuation due to rain, especially with heavy and very heavy intensity. This study aims to evaluate the attenuation correction ability of the reflectivity raw data generated by the weather radar against the calculation of rainfall estimates at the Juanda Sidoarjo Meteorological Station, as well as the best attenuation correction coefficient to be applied in the processing of rainfall estimates by weather radar. The method used to perform attenuation correction is Z-based attenuation correction (ZATC). The calculation of attenuation correction using the ZATC method uses several  $a$  and  $\beta$  coefficients while the Z-R relation ( $Z = 200R^{1.6}$ ) is used to calculate the estimated rainfall before and after attenuation correction. The results showed that the attenuation correction of the C band weather radar reflectivity raw data was able to provide an increase in the accuracy of rainfall estimation where in the estimation of rainfall from a weather radar without the attenuation correction stage of the raw data, an accuracy value of 70.8% was obtained, while applying the attenuation correction using several  $a$  and  $\beta$  coefficients obtained an increase in the accuracy of rainfall estimation between 72.5% to 86.9%. The best  $a$  and  $\beta$  coefficients for attenuation correction of weather radar reflectivity (dBz) can be applied in obtaining a more accurate rainfall estimate, namely the  $a$  and  $\beta$  coefficients according to Krämer and Verworn which are able to provide an increase in the accuracy of rainfall estimation by 16.1%.

**Keywords:** Attenuation; Remote sensing; Rainfall; Reflectivity; Weather radar.

#### ABSTRAK

Estimasi curah hujan menggunakan radar cuaca band C memunculkan ketidakpastian pada hasil akurasi estimasinya. Penyebabnya adalah gangguan meteorologi dan non meteorologi yang mempengaruhi raw data reflektivitas (dBz), salah satunya yaitu atenuasi karena hujan terutama dengan intensitas lebat dan sangat lebat. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan koreksi atenuasi pada raw data reflektivitas yang dihasilkan oleh radar cuaca terhadap perhitungan estimasi curah hujan di Stasiun Meteorologi Juanda Sidoarjo, serta koefisien koreksi atenuasi mana yang terbaik untuk dapat diterapkan di dalam pengolahan estimasi curah hujan oleh radar cuaca. Metode yang digunakan untuk melakukan koreksi atenuasi yaitu Z-based attenuation correction (ZATC). Perhitungan koreksi atenuasi dengan metode ZATC menggunakan beberapa koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  adapun relasi Z-R ( $Z=200R^{1.6}$ ) digunakan

\*Corresponding author: [kosasih.bmkg@gmail.com](mailto:kosasih.bmkg@gmail.com)

Copyright ©2021 THE AUTHOR(S). This article is distributed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Jurnal Teknosains is published by the Graduate School of Universitas Gadjah Mada.

untuk perhitungan estimasi curah hujan sebelum dan sesudah dilakukan koreksi atenuasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koreksi atenuasi terhadap raw data reflektivitas radar cuaca band C mampu memberikan peningkatan akurasi estimasi curah hujan dimana pada estimasi curah hujan dari radar cuaca tanpa dilakukan tahapan koreksi atenuasi terhadap raw data diperoleh nilai akurasi sebesar 70.8% sedangkan dengan menerapkan koreksi atenuasi menggunakan beberapa koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  diperoleh peningkatan akurasi estimasi curah hujan antara 72.5% sampai dengan 86.9%. Nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  untuk koreksi atenuasi raw data reflektivitas (dBz) radar cuaca yang terbaik untuk dapat diterapkan dalam memperoleh estimasi curah hujan yang lebih akurat yaitu dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn yang mampu memberikan peningkatan akurasi estimasi curah hujan sebesar 16.1%.

**Kata Kunci:** *Atenuasi; Curah hujan; Penginderaan jauh; Radar cuaca; Reflektivitas.*

## PENGANTAR

Estimasi curah hujan secara kuantitatif dengan menggunakan radar cuaca merupakan suatu proses yang sangat kompleks. Ada banyak sumber gangguan saat proses pengamatan oleh radar cuaca baik meteorologi (*atenuasi, bright band echo*) dan nonmeteorologi (*clutter, signal propagation*) yang dapat mempengaruhi kualitas *raw data* radar cuaca, sehingga menyebabkan ketidakpastian hasil estimasi curah hujan dari radar cuaca (Harrison, Driscoll and Kitchen, 2000). Untuk memperoleh *raw data* (data mentah) yang berkualitas sebagai hasil pengamatan radar cuaca maka sangat perlu dilakukan proses koreksi sebelum diolah dengan sejumlah algoritma untuk menghasilkan informasi estimasi curah hujan (Friedrich, Hagen and Einfalt, 2006). Beberapa metode yang telah diterapkan para peneliti dalam memperbaiki kualitas *raw data* reflektivitas radar adalah mengkoreksi *raw data* reflektivitas dengan beberapa jenis koreksi di antaranya yaitu koreksi *clutter* (Hannesen & Loffler-Mang, 1998; Gabella & Notarpietro, 2002; Hubbert et al., 2009), *attenuation* (Hitschfeld & Bordan, 1954; Atlas & Ulbrich, 1977; Olsen et al., 1978; Bringi et al., 1990; Harrison et al., 2000; Bringi

et al., 2001; Krämer & Verworn, 2008), dan *bright band* (Smith, 1986; Kitchen et al., 1994; Hardaker et al., 1995). Adapun koreksi yang akan diterapkan pada *raw data* reflektivitas radar cuaca *band C* di Stasiun Meteorologi Juanda yaitu metode koreksi atenuasi (*attenuation*) *Z-based attenuation correction* (ZATC) yang dikembangkan Hitschfeld dan Bordan dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan, Harrison serta Krämer dan Verworn sebelum proses perhitungan estimasi curah hujan menggunakan persamaan model relasi Z-R Marshall-Palmer, sehingga hasil yang diharapkan yaitu adanya peningkatan akurasi estimasi curah hujan yang dihasilkan oleh radar cuaca tersebut. Hujan merupakan objek utama yang diamati oleh radar cuaca, sekaligus merupakan sumber utama yang menyebabkan ketidakpastian di dalam mengestimasi curah hujan dengan radar cuaca *band C* terutama hujan dengan intensitas lebat (Jacobi and Heistermann, 2016). Ketidakpastian tersebut diakibatkan adanya gangguan berupa atenuasi oleh hujan yang menyebabkan pelemahan energi pulsa radar yang diterima oleh *receiver* pada sistem radar cuaca. Besarnya pelemahan energi tergantung terhadap intensitas curah hujan, jarak objek hujan dengan radar cuaca, dan panjang gelombang radar yang digunakan.

Semakin lebat intensitas curah hujan dan semakin pendek panjang gelombang yang digunakan oleh radar cuaca maka nilai atenuasi yang mempengaruhi *raw data* reflektivitas (dBz) radar akan semakin besar (Jacobi and Heistermann, 2016). *Raw data* reflektivitas yang tidak terkoreksi akan menambah ketidakpastian dalam perhitungan estimasi curah hujan oleh sistem radar cuaca sehingga pada akhirnya akan berpengaruh terhadap kualitas informasi cuaca publik maupun peringatan dini cuaca ekstrim. Operasional radar cuaca *band C* di Stasiun Meteorologi Juanda saat melakukan proses estimasi curah hujan belum dilakukan koreksi atenuasi terhadap *raw data* reflektivitas maupun koreksi gangguan meteorologi dan nonmeteorologi lainnya, sebatas melakukan filter terhadap sinyal radar cuaca yang diterima oleh *receiver*.

Hujan merupakan salah satu fenomena cuaca yang dapat diamati intensitasnya melalui dua cara

yaitu pengukuran langsung dan tidak langsung (Munawar, 2016; WMO, 2017). Pengamatan curah hujan secara langsung dilakukan dengan menggunakan alat penakar curah hujan manual maupun penakar otomatis sementara pengamatan curah hujan secara tidak langsung dilakukan dengan menerapkan teknologi penginderaan jauh seperti satelit dan radar cuaca. Sistem penginderaan jauh tersebut mampu menghasilkan estimasi curah hujan melalui proses perolehan dan pengolahan dengan algoritma tertentu untuk menghasilkan informasi curah hujan, yang dapat menjangkau wilayah secara luas dengan waktu yang relatif lebih cepat.

Radar meteorologi atau radar cuaca mampu memberikan informasi parameter cuaca berupa curah hujan secara kuantitatif serta arah dan kecepatan angin vertikal maupun horizontal. Radar memancarkan gelombang elektromagnetik dalam bentuk pulsa yang dipancarkan melalui antena dengan panjang gelombang tertentu. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan antena

secara langsung mengenai target (objek) yang berada pada area *beam* radar. Perhitungan matematis yang berkaitan dengan target (objek) pada gelombang elektromagnetik radar cuaca terbagi menjadi dua bagian yaitu perhitungan untuk target titik (*point target*) dan perhitungan untuk target meteorologi (*meteorological target*) (Rinehart, 2004; Skolnik, 2008; Fukao & Hamazu, 2014; Rauber & Nesbitt, 2018). Saat ini, radar cuaca yang dioperasikan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) di beberapa lokasi di wilayah Indonesia yaitu sebanyak 37 radar cuaca jenis *band C* polarisasi tunggal, satu radar cuaca jenis *band X* polarisasi tunggal dan tiga radar cuaca jenis *band X* dual polarisasi, yang diharapkan akan mampu menunjang pelayanan terhadap publik baik berupa informasi rutin dan informasi peringatan dini (*Meteorological Early Warning Sistem, MEWS*) (Wardoyo, 2015).

Intensitas curah hujan adalah jumlah curah hujan dalam satu satuan waktu tertentu (Mori, 2003; WMO, 2017). Klasifikasi intensitas curah hujan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1  
Klasifikasi intensitas curah hujan menurut Mori, WMO, dan BMKG

Keadaan curah hujan	Intensitas curah hujan (mm)				
	Mori (2003)		WMO (2017)	BMKG	
	1 jam	24 jam	1 jam	1 jam	24 jam
Hujan sangat ringan	<1	<5	-	-	-
Hujan ringan	1-5	5-20	$i < 2.5$	1-5	5-20
Hujan normal/ sedang	5-20	20-50	$2.5 \leq i < 10.0$	5-10	20-50
Hujan lebat	10-20	50-100	$10.0 \leq i < 50.0$	10-20	50-100
Hujan sangat lebat/ violent/ ekstrim	> 20	> 100	$i \geq 50.0$	> 20	> 100

Sumber: Mori (2003), WMO (2017) dan BMKG (2010)

Terjadinya atenuasi akan mengakibatkan pengurangan kekuatan gelombang elektromagnetik ketika melewati air hujan terutama bagi radar yang memiliki panjang gelombang kurang dari 10 cm (Rico-ramirez, 2012). Pelemahan kekuatan gelombang elektromagnetik pada radar cuaca *band C* terjadi meskipun pada hujan intensitas ringan sementara itu penurunan nilai reflektivitas ( $Z_{\text{H}}$ ) pada radar cuaca dihasilkan oleh gangguan atenuasi akan menyebabkan terjadinya kesalahan ketika mengestimasi

curah hujan (Bringi dkk., 2001; G. Park dkk., 2005). Gangguan atenuasi yang bersumber dari hujan dan terjadi pada saat pengamatan radar cuaca harus dapat diminimalisir dengan menggunakan algoritma koreksi atenuasi sebelum *raw data* diolah menjadi informasi estimasi curah hujan.

Proses untuk dapat menghilangkan dan atau mengurangi gangguan meteorologi berupa atenuasi yang disebabkan oleh hujan pada *raw data* reflektivitas radar cuaca *band C* sebelum dilakukan tahapan estimasi curah hujan yaitu

dengan metode *Z-based attenuation correction* (ZATC) yang dikembangkan Hitschfeld dan Bordan pada tahapan *pre-processing* untuk koreksi atenuasi terhadap *raw data* reflektivitas radar cuaca di Stasiun Meteorologi Juanda dengan menggunakan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan, Harrison serta Kramer dan Verworn untuk dapat meningkatkan dan memperbaiki akurasi estimasi curah hujan.

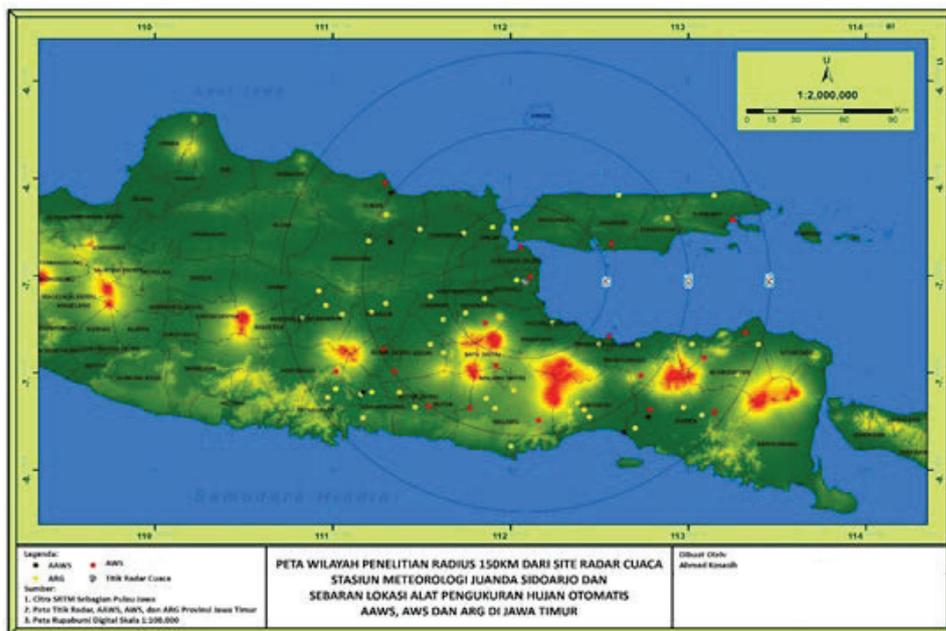
Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi hasil estimasi curah hujan sebelum dan sesudah dilakukan koreksi terhadap *raw data* reflektivitas radar cuaca *band C* serta membandingkan kemampuan algoritma koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  untuk koreksi atenuasi *raw data* reflektivitas menurut Battan, Harrison serta Krämer dan Verworn untuk mengetahui algoritma terbaik dalam menghasilkan informasi estimasi curah hujan yang akurat pada sistem radar cuaca di Stasiun Meteorologi Juanda. Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat adanya peningkatan akurasi estimasi curah hujan pada radar cuaca *band C* di Stasiun Meteorologi Juanda Sidoarjo.

**Data**

Beberapa data yang digunakan di dalam penelitian ini yaitu *raw data* reflektivitas (dBz) saat terjadi hujan baik dengan intensitas

ringan sampai dengan sangat lebat pada bulan November 2018 sampai dengan Maret 2019 dari Stasiun Meteorologi Juanda Sidoarjo Jawa Timur, data *freezing level* rata-rata bulanan selama 10 tahun (2010 – 2019) saat bulan November – Maret, data tinggi dasar awan rata-rata bulan November 2018 – Maret 2019, data curah hujan hasil pengukuran penakar hujan *tipping bucket* per 5 menit dan 10 menit yang terpasang pada AAWS, AWS dan ARG di 74 titik yang berada dalam radius 150 km dari lokasi radar cuaca *band C* Stasiun Meteorologi Juanda Sidoarjo Jawa Timur serta data curah hujan hasil pengukuran observatorium pada bulan November 2018 sampai dengan Maret 2019 di delapan Stasiun BMKG di Jawa Timur.

Radar cuaca *band C* polarisasi tunggal di Stasiun Meteorologi Juanda Sidoarjo Jawa Timur dipilih untuk menjadi lokasi penelitian koreksi atenuasi yang disebabkan gangguan meteorologi berupa hujan. Pemilihan tersebut didasarkan pada operasional radar cuaca di Stasiun Meteorologi Juanda yang memiliki kontinuitas data yang baik secara temporal dan gangguan (*clutter*) non meteorologi terutama yang diakibatkan interferensi yaitu gangguan dari peralatan yang menggunakan frekuensi yang sama dengan radar cuaca. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. Wilayah penelitian

## Metode

Koreksi atenuasi dilakukan untuk memperbaiki nilai reflektivitas (dBz) yang berkurang karena adanya peredaman kekuatan sinyal saat proses pemindaian data baik pada saat sinyal dipancarkan maupun pada saat kembali ke sistem radar cuaca (*specific two-way attenuation*) hal tersebut terjadi akibat sinyal melewati objek meteorologi berupa air hujan. Semakin besar intensitas curah hujan yang dilewati sinyal dari radar cuaca, maka kemungkinan terjadinya pelemahan kekuatan sinyal akan semakin besar pula. Intensitas curah hujan didapatkan dari besarnya reflektivitas (dBz) dengan menggunakan relasi antara Z-R, hal yang sama hubungan antara intensitas curah hujan (R) dalam mm jam<sup>-1</sup> dengan besarnya atenuasi ( $\delta A/\delta r$ ) dalam satuan db km<sup>-1</sup> terhadap kekuatan sinyal saat dipancarkan dan kembali sebagai nilai reflektivitas (dBz) ke sistem radar cuaca (*specific two-way attenuation*). Koreksi atenuasi menggunakan metode ZATC dilakukan pada setiap *gate* sepanjang *ray path* dari *beam radar* yang termasuk ke dalam *sample volume* pada saat pemindaian data oleh radar cuaca. Metode tersebut dikembangkan Hitschfeld dan Bordan (1954) dengan nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  diperoleh dari Battan (1973). Algoritma *C band power law* menggunakan nilai koefisien alpha ( $\alpha$ ) 0.0044 dan nilai koefisien beta ( $\beta$ ) 1.17; algoritma *C band linear* menggunakan nilai koefisien alpha ( $\alpha$ ) 0.0062 dan nilai koefisien beta ( $\beta$ ) 1.0; algoritma dari Harrison (2000) menggunakan nilai koefisien alpha ( $\alpha$ ) 0.00914 dan nilai koefisien beta ( $\beta$ ) 1.17 serta algoritma yang dikembangkan Krämer dan Verworn (2008) dengan nilai koefisien alpha ( $\alpha$ ) 0.0334 dan nilai koefisien beta ( $\beta$ ) 1.12. Keempat algoritma koreksi atenuasi tersebut dipakai untuk memperbaiki *raw data* radar *band C* dari gangguan meteorologi berupa hujan sehingga diperoleh *raw data* yang sudah terkoreksi sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut berupa estimasi curah hujan dengan persamaan Marshall-Palmer.

Koreksi atenuasi dengan algoritma *linear* dan *power law* nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  (Battan) yang diterapkan pada algoritma koreksi atenuasi metode ZATC dibatasi untuk nilai

maksimum spesifik atenuasi ( $\delta A_{\max}/\delta r$ ) (*maximum two-way specific attenuation*) sebesar hanya 5 db km<sup>-1</sup>. Jika saat proses perhitungan atenuasi *gate by gate* dalam jarak (r) pada satu *ray path* didapatkan nilai di atas 5 db km<sup>-1</sup> maka nilai atenuasinya akan tetap sebesar 5 db km<sup>-1</sup> sedangkan jika nilai perhitungan di bawah *threshold* (5 db km<sup>-1</sup>) maka besaran atenuasinya sesuai dengan hasil perhitungan. Batasan atau *threshold* untuk nilai total atenuasi maksimum (*maximum two-way total attenuation*) adalah sebesar 20 db ( $A_{\max}$ ). Jika nilai total maksimum atenuasi ( $A_{\max}$ ) antar *gate* di akhir perhitungan satu *ray path* lebih besar dari *threshold* yang telah ditentukan ( $A_{\max} > 20$  db) maka akan dilakukan perhitungan ulang menggunakan nilai *offset* reflektivitas tetap ( $\Delta$ dBz) untuk menghitung semua nilai reflektivitas (dBz) hasil pengukuran radar ( $\text{dBz} = \text{dBz}_{\text{Meas}} + \Delta$ dBz) pada proses estimasi curah hujan ( $Z = aR^b$ ). Koreksi nilai reflektivitas (dBz) selesai jika nilai total atenuasi  $A \leq A_{\max}$  dalam satu *ray path*.

Proses koreksi atenuasi dengan algoritma *power law* yang diterapkan dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  Harrison diberikan batasan untuk nilai maksimum spesifik atenuasi ( $\delta A_{\max}/\delta r$ ) maupun nilai total atenuasi maksimum ( $A_{\max}$ ) sesuai hasil penelitian Battan. Koreksi atenuasi dengan algoritma *power law* yang diterapkan dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  Krämer dan Verworn diberikan batasan nilai maksimum spesifik atenuasi ( $\delta A_{\max}/\delta r$ ) sesuai hasil penelitian Battan, sedangkan total atenuasi maksimum ( $A_{\max}$ ) sebesar 20 db merupakan hasil modifikasi Jacobi & Heistermann (2016) dan memberikan nilai maksimum reflektivitas ( $\text{dBz}_{\text{corr, max}}$ ) 59, artinya ketika diaktifkan  $\text{dBz}_{\text{corr, max}}$  maka nilai reflektivitas yang bernilai diatas 59 dBz tidak dilakukan koreksi atenuasi atau atenuasi bernilai nol db km<sup>-1</sup>.

Pengolahan koreksi atenuasi menerapkan wilayah koreksi hanya sebatas *gate* yang berada di bawah *freezing level* (0° C) artinya bahwa yang akan dilakukan proses koreksi atenuasi hanya untuk hujan. Ketinggian rata-rata *freezing level* dari hasil pengamatan udara atas di Stasiun Meteorologi Juanda adalah 4.9 km untuk bulan November sampai dengan Maret dalam kurun waktu 10 tahun (2010-2019). Hasil dari koreksi

raw data ini adalah raw data baru yang sudah terkoreksi dari gangguan meteorologi (hujan) dan selanjutnya dapat dilakukan perhitungan estimasi curah hujan dengan persamaan model relasi Z-R Marshall-Palmer ( $Z=200R^{1.6}$ ).

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil penelitian yang dilakukan secara umum mendukung kajian yang dilakukan oleh beberapa peneliti lain yaitu kajian oleh Harrison, Driscoll & Kitchen (2000), Jacobi & Heistermann (2016) dan Krämer & Verworn (2008). Ada sebanyak 45 lokasi penakar hujan tipping bucket yang terpasang pada AAWS, AWS dan ARG dengan radius 150 km dari radar cuaca band C Stasiun Meteorologi Juanda yang dapat dipergunakan untuk mengevaluasi kemampuan estimasi curah hujan dari radar cuaca dengan jumlah hari yang bervariasi. Kisaran jumlah hasil evaluasi kemampuan estimasi radar cuaca dengan proses koreksi atenuasi dan tanpa koreksi atenuasi setiap lokasi yaitu antara 1 - 35 hari. Secara keseluruhan, persentase tingkat kesalahan terkecil (RMSE) dalam perolehan hasil estimasi

curah hujan oleh radar cuaca tanpa dilakukan koreksi atenuasi terlebih dahulu adalah sebesar 70,8% yang berada pada 45 lokasi dalam radius 150 km, sedangkan jika pada raw data dilakukan proses koreksi atenuasi dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari Battan, Harrison, maupun Krämer dan Verworn maka persentase nilai RMSE-nya bertambah sebesar 29.2%. Penambahan akurasi estimasi curah hujan setelah dilakukan koreksi atenuasi terhadap raw data sesuai dengan apa yang dihasilkan oleh Harrison, Driscoll & Kitchen (2000) maupun Jacobi & Heistermann (2016) dan Krämer & Verworn (2008) meskipun presentase penambahan akurasi akan berbeda.

Perbandingan data persentase RMSE antara data penakar hujan tipping bucket dengan estimasi curah hujan dari radar cuaca setiap lokasi tipping bucket yang terpasang pada AAWS, AWS dan ARG se Jawa Timur dalam radius 150 km dari radar cuaca band C Stasiun Meteorologi Juanda dengan proses tahapan koreksi atenuasi menggunakan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari Battan (linear dan power law), Harrison, maupun Krämer dan Verworn serta pengolahan tanpa dilakukan koreksi atenuasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2  
 Persentase RMSE estimasi curah hujan radar cuaca dengan dilakukan koreksi atenuasi dan tanpa koreksi atenuasi

No	Radius	Lokasi	Persentase RMSE (%)					
			Tanpa Koreksi	Koreksi Atenuasi				
				Total per lokasi	Linear	Power Law	Harrison	Krämer dan Verworn
1	50	ARG Socah, Kab. Bangkalan	90	10	3.3	6.7	0	0
2	50	ARG Lamongan, Kab. Lamongan	100	0	0	0	0	0
3	50	AWS Mojokerto, Kab. Mojokerto	81	19	0	9.5	9.5	0
4	50	ARG Sruni Gedangan, Kab. Sidoarjo	60	40	14.3	0	5.7	20
5	50	AWS Maritim Perak II, Kota Surabaya	83.3	16.7	5.6	11.1	0	0
6	50	AWS Digi Stamet Juanda Surabaya, Kota Surabaya	100	0	0	0	0	0
7	100	ARG Mojowarno, Kab. Jombang	96.6	3.4	0	0	3.4	0
8	100	ARG Kediri, Kab. Kediri	93.3	6.7	0	6.7	0	0
9	100	AWS Kandat, Kab. Kediri	93.3	6.7	0	0	0	6.7

**AHMAD KOSASIH, HARTONO, DAN RETNADI HERU JATMIKO ❖ PENGARUH KOREKSI  
ATENUASI RADAR CUACA TERHADAP PERHITUNGAN ESTIMASI CURAH HUJAN ...**

Lanjutan Tabel 2

No	Radius	Lokasi	Persentase RMSE (%)					
			Tanpa Koreksi	Koreksi Atenuasi				
				Total per lokasi	Linear	Power Law	Harrison	Krämer dan Verworn
10	100	ARG Pronojiwo, Kab. Lumajang	33.3	66.7	0	0	0	66.7
11	100	ARG Pasrujambe, Kab. Lumajang	100	0	0	0	0	0
12	100	ARG Tajinan, Kab. Malang	93.5	6.5	6.5	0	0	0
13	100	ARG Nganjuk, Kab. Nganjuk	100	0	0	0	0	0
14	100	ARG SMPK Nganjuk, Kab. Nganjuk	80	20	0	0	16.7	3.3
15	100	ARG Pakong, Kab. Pamekasan	50	50	0	16.7	33.3	0
16	100	ARG Triwong Kidul, Kab. Probolinggo	90.5	9.5	0	0	4.8	4.8
17	100	ARG Pajarakan Kulon, Kab. Probolinggo	85	15	0	5	5	5
18	100	AWS Pelabuhan Probolinggo, Kab. Probolinggo	100	0	0	0	0	0
19	100	ARG Sampang, Kab. Sampang	88.9	11.1	0	0	0	11.1
20	100	AWS Sampang, Kab. Sampang	100	0	0	0	0	0
21	100	ARG Widang, Kab. Tuban	88.9	11.1	0	11.1	0	0
22	100	ARG Tuban, Kab. Tuban	70.4	29.6	7.4	3.7	7.4	11.1
23	100	ARG Ngajum, Kota Malang	0	100	0	0	0	100
24	100	AWS Staklim Malang, Kota Malang	0	100	0	0	8.3	91.7
25	150	ARG Kademangan, Kab. Blitar	33.3	66.7	0	0	0	66.7
26	150	ARG Srengat, Kab. Blitar	0	100	0	0	0	100
27	150	ARG Cerme, Kab. Bondowoso	70	30	0	0	10	20
28	150	ARG Jatibanteng, Kab. Bondowoso	100	0	0	0	0	0
29	150	ARG Pinang Pahit, Kab. Bondowoso	0	100	0	0	100	0
30	150	AWS Bondowoso, Kab. Bondowoso	100	0	0	0	0	0
31	150	ARG Kencong, Kab. Jember	64.7	35.3	5.9	11.8	5.9	11.8
32	150	ARG Wirolegi, Kab. Jember	50	50	0	5	30	15
33	150	AWS Tanggul, Kab. Jember	100	0	0	0	0	0
34	150	AAWS Yosowilangun, Kab. Lumajang	0	100	0	0	33.3	66.7
35	150	ARG Caruban, Kab. Madiun	100	0	0	0	0	0
36	150	ARG Kartoharjo, Kab. Madiun	94.1	5.9	0	0	5.9	0
37	150	ARG SMPK Sebayi Gemarang, Kab. Madiun	62.5	37.5	0	0	12.5	25
38	150	ARG Sitarjo, Kab. Malang	52.9	47.1	5.9	17.6	11.8	11.8
39	150	ARG Ngawi, Kab. Ngawi	100	0	0	0	0	0
40	150	AWS Panarukan, Kab. Situbondo	50	50	0	0	50	0
41	150	ARG Dasuk, Kab. Sumenep	40	60	0	0	20	40
42	150	AWS Digi Stamet Kalianget, Kab. Sumenep	78.9	21.1	0	0	5.3	15.8
43	150	ARG SMPK Karang, Kab. Trenggalek	40	60	20	0	20	20

Lanjutan Tabel 2

No	Radius	Lokasi	Persentase RMSE (%)					
			Tanpa Koreksi	Koreksi Atenuasi				
				Total per lokasi	Linear	Power Law	Harrison	Krämer dan Verworn
44	150	ARG Gondang, Kab. Tulungagung	88.2	11.8	5.9	0	5.9	0
45	150	AWS Digi Stamet Tuban, Kab. Tuban	83.3	16.7	0	0	5.6	11.1
Total persentase			70.8	29.2	1.7	2.3	9.1	16.1

Sumber: Pengolahan (2019)

Berdasarkan jarak lokasi AAWS, AWS dan ARG dengan lokasi *site* radar cuaca maka persentase RMSE estimasi curah hujan tanpa koreksi atenuasi mengalami penurunan seiring dengan semakin jauh jaraknya dari titik radar cuaca, sedangkan persentase RMSE estimasi curah hujan dengan dilakukan koreksi atenuasi dengan menggunakan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari

Battan (*linear dan power law*), Harrison, maupun Krämer dan Verworn terhadap *raw data* radar mengalami peningkatan seiring penambahan jarak dari lokasi radar cuaca *band C* Stasiun Meteorologi Juanda. Persentase RMSE estimasi curah hujan menurut jarak dari *site* radar cuaca pada masing-masing algoritma dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3

Persentase RMSE antara estimasi curah hujan dari radar cuaca yang dilakukan koreksi atenuasi dengan tanpa koreksi atenuasi berdasarkan jarak terhadap *site* radar cuaca *band C* Stasiun Meteorologi Juanda

Jarak dari <i>site</i> radar cuaca (km)	Persentase RMSE (%)					
	Tanpa Koreksi	Total Koreksi Atenuasi	Linear	Power Law	Harrison	Krämer dan Verworn
50	85.7	14.3	3.9	4.6	2.5	3.3
100	75.8	24.2	0.8	2.4	4.4	16.7
150	62.3	37.7	1.8	1.6	15.0	19.2

Sumber: Pengolahan (2019)

Terjadinya penurunan nilai akurasi estimasi curah hujan hasil pengamatan radar cuaca tanpa dilakukan koreksi terhadap *raw data* disebabkan oleh penurunan energi dari pulsa radar yang diterima kembali oleh radar cuaca sepanjang *ray path* dalam *beam* radar cuaca. Pengurangan energi yang disebabkan gangguan atenuasi akan terus bertambah seiring pertambahan jarak obyek hujan dengan posisi radar cuaca ( $\text{db km}^{-1}$ ).

Hasil pengolahan estimasi curah hujan radar cuaca *band C* dengan empat koefisien koreksi atenuasi dan tanpa koreksi atenuasi terhadap *raw data* radar cuaca menghasilkan 575 informasi uji kemampuan (korelasi dan RMSE) antara estimasi curah hujan dengan empat

koefisien koreksi atenuasi dan tanpa koreksi atenuasi terhadap curah hujan hasil pengukuran langsung dari alat penakar hujan *tipping bucket*.

Lokasi persebaran AAWS, AWS dan ARG sejumlah 45 lokasi pada 24 Kabupaten/Kota se Jawa Timur memiliki karakteristik topografi wilayah yang berbeda. Wilayah yang berada di selatan dari *site* radar cuaca *band C* Stasiun Meteorologi Juanda merupakan wilayah perbukitan dan pegunungan sedangkan wilayah utara Jawa Timur merupakan dataran rendah. Gangguan atenuasi yang disebabkan oleh hujan dengan intensitas sangat lebat akan berbeda dengan hujan intensitas ringan. Hujan dengan intensitas lebat atau sangat lebat sangat berdampak terhadap penurunan nilai reflektivitas

**AHMAD KOSASIH, HARTONO, DAN RETNADI HERU JATMIKO ❖ PENGARUH KOREKSI ATENUASI RADAR CUACA TERHADAP PERHITUNGAN ESTIMASI CURAH HUJAN ...**

yang akhirnya menyebabkan penurunan nilai estimasi curah hujan secara kuantitatif.

ARG Sruni Gedangan Kabupaten Sidoarjo merupakan alat penakar hujan *tipping bucket* terdekat dengan lokasi radar cuaca *band C* Stasiun Meteorologi Juanda pada radius 50 km, ARG tersebut menghasilkan 14 informasi RMSE antara estimasi curah hujan dari radar cuaca yang telah diproses koreksi atenuasi

dengan data pengukuran hujan secara langsung dari total 35 informasi RMSE untuk 49 hari pengolahan *raw data* radar cuaca dan data curah hujan. Hasil pengolahan diperoleh RMSE estimasi dengan menerapkan koreksi atenuasi 40%, dengan presentase tertinggi diperoleh koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn sebesar 20%, Battan (*linear*) sebesar 14.3% dan Harrison sebesar 5.7%.

Tabel 4

Nilai RMSE estimasi curah hujan yang telah diterapkan koreksi atenuasi dengan nilai koefisien menurut Battan (*linear* dan *power law*), Harrison, serta Kramer dan Verworn pada ARG Sruni Gedangan Kab. Sidoarjo

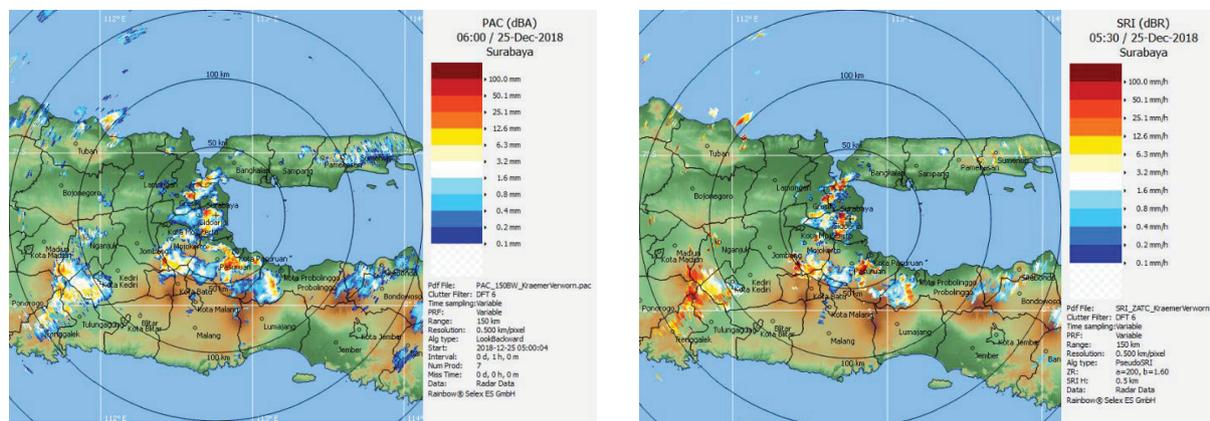
Tanggal	Linear		Power Law		Harrison		Krämer dan Verworn	
	Korelasi	RMSE	Korelasi	RMSE	Korelasi	RMSE	Korelasi	RMSE
25/12/2018	0.999	7.369	0.999	7.24	0.999	6.129	1	2.35

Sumber: Pengolahan (2019)

Pada tabel 4 tanggal 25 Desember 2018 sebagai studi kasus estimasi curah hujan dari radar cuaca dengan dilakukan koreksi sebelumnya, koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn menghasilkan nilai RMSE sebesar 2.35 yang merupakan tingkat kesalahan terkecil dalam pengolahan data estimasi curah hujan di wilayah ARG Sruni Gedangan Kabupaten Sidoarjo dibandingkan dengan nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan maupun Harrison. Secara spasial estimasi curah hujan dengan koreksi atenuasi menggunakan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn pada tanggal 25 Desember 2018 dapat dilihat pada Gambar 2 (a) dan 2 (b) sedangkan Gambar 3 menunjukkan grafik estimasi curah hujan

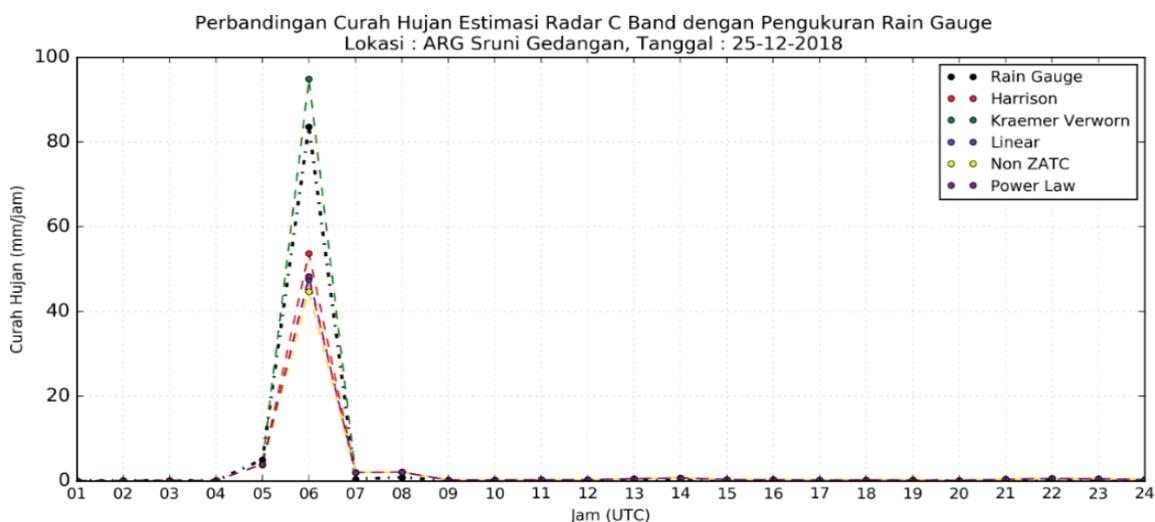
dari radar cuaca dibandingkan pengukuran langsung oleh *tipping bucket*.

Gambar 2 (a) memperlihatkan secara spasial bagaimana saat terjadi hujan di wilayah ARG Sruni Gedangan Kab. Sidoarjo. Gradasi warna pada legenda citra radar cuaca hasil perhitungan *precipitation accumulation* (PAC) jam 06.00 utc (13.00 wib) menunjukkan warna kuning sampai dengan warna coklat muda yang mendominasi sekitar wilayah Kabupaten Sidoarjo dengan estimasi curah hujan 6.3 – 50 mm jam<sup>-1</sup>. Hasil perhitungan *surface rainfall intensity* (SRI) pada jam pengamatan radar cuaca 05.30 utc (12.30 wib) yang diperlihatkan oleh Gambar 2 (b) menunjukkan gradasi warna kuning hingga coklat dengan kisaran nilai estimasi curah hujan 6.3 – 100 mm jam<sup>-1</sup>.



Gambar 2.

(a) Hasil *Precipitation Accumulation* (PAC) jam 06.00 utc (b) SRI jam 05.30 utc dengan koreksi atenuasi menggunakan nilai koefisien menurut Kramer dan Verworn tanggal 25 Desember 2018



Gambar 3.

Hasil perbandingan estimasi PAC radar cuaca dengan akumulasi pengukuran *tipping bucket* per 1 jam ARG Sruni Gedangan Kab. Sidoarjo tanggal 25 Desember 2018

Pada tanggal 25 Desember 2018 hasil pengukuran curah hujan *tipping bucket* untuk akumulasi jam 06.00 utc (13.00 wib) tercatat sebesar 83.6 mm jam<sup>-1</sup> yang artinya pada rentang waktu 05.10 - 06.00 utc telah terjadi hujan dengan intensitas sangat lebat yang menyebabkan pelemahan energi pada pulsa radar cuaca *band C* sehingga nilai reflektivitas (dBz) yang dihasilkan tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Estimasi curah hujan dari radar cuaca saat dilakukan koreksi atenuasi dengan nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan (*linear* dan *power law*) dan Harrison untuk akumulasi jam 06.00 utc adalah sebesar 47.592 mm jam<sup>-1</sup> (*linear*), 48.225 mm jam<sup>-1</sup> (*power law*) dan Harrison sebesar 53.689 mm jam<sup>-1</sup>. Hasil estimasi curah hujan ketika dilakukan koreksi atenuasi dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut

Krämer dan Verworn menjadi sebesar 94.819 mm jam<sup>-1</sup> dimana hasil ini lebih mendekati nilai hasil pengukuran curah hujan dari *tipping bucket* yang terpasang pada ARG Sruni Gedangan Kab. Sidoarjo.

AWS Stasiun Klimatologi Malang di Kota Malang menghasilkan 24 informasi RMSE estimasi curah hujan yang telah dilakukan koreksi atenuasi dari 49 hari pengolahan *raw data* radar cuaca dan data curah hujan *tipping bucket*. Hasil pengolahan diperoleh RMSE estimasi dengan menerapkan koreksi atenuasi sebesar 100%, dengan presentase tertinggi diperoleh koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn sebesar 91.7% dan Harrison sebesar 8.3%. Tabel 5 memperlihatkan hasil korelasi dan RMSE estimasi curah hujan radar dengan menerapkan koreksi atenuasi pada AWS Stasiun Klimatologi Malang, Kota Malang pada tanggal 10 Februari 2019.

Tabel 5

Nilai RMSE estimasi curah hujan yang telah diterapkan koreksi atenuasi dengan nilai koefisien menurut Battan (*linear* dan *power law*), Harrison, serta Kramer dan Verworn pada AWS Staklim Malang di Kota Malang

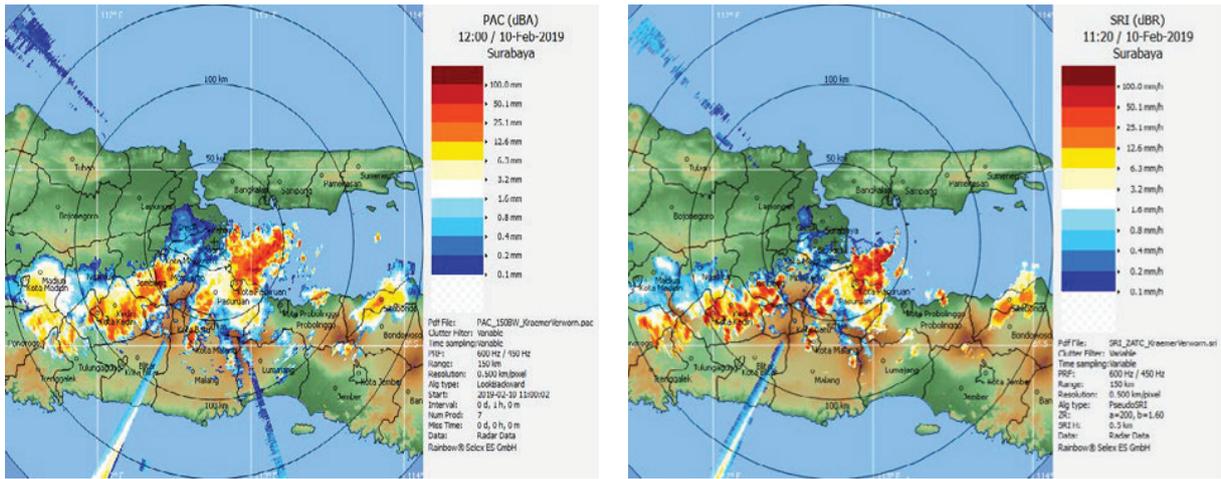
Tanggal	Linear		Power Law		Harrison		Krämer dan Verworn	
	Korelasi	RMSE	Korelasi	RMSE	Korelasi	RMSE	Korelasi	RMSE
10/02/2019	0.978	4.926	0.98	4.918	0.992	4.535	0.975	1.446

Sumber: Pengolahan (2019)

**AHMAD KOSASIH, HARTONO, DAN RETNADI HERU JATMIKO ❖ PENGARUH KOREKSI ATENUASI RADAR CUACA TERHADAP PERHITUNGAN ESTIMASI CURAH HUJAN ...**

Pada studi kasus penerapan koreksi atenuasi untuk memperoleh estimasi curah

hujan dari radar cuaca untuk AWS Staklim Malang Kota

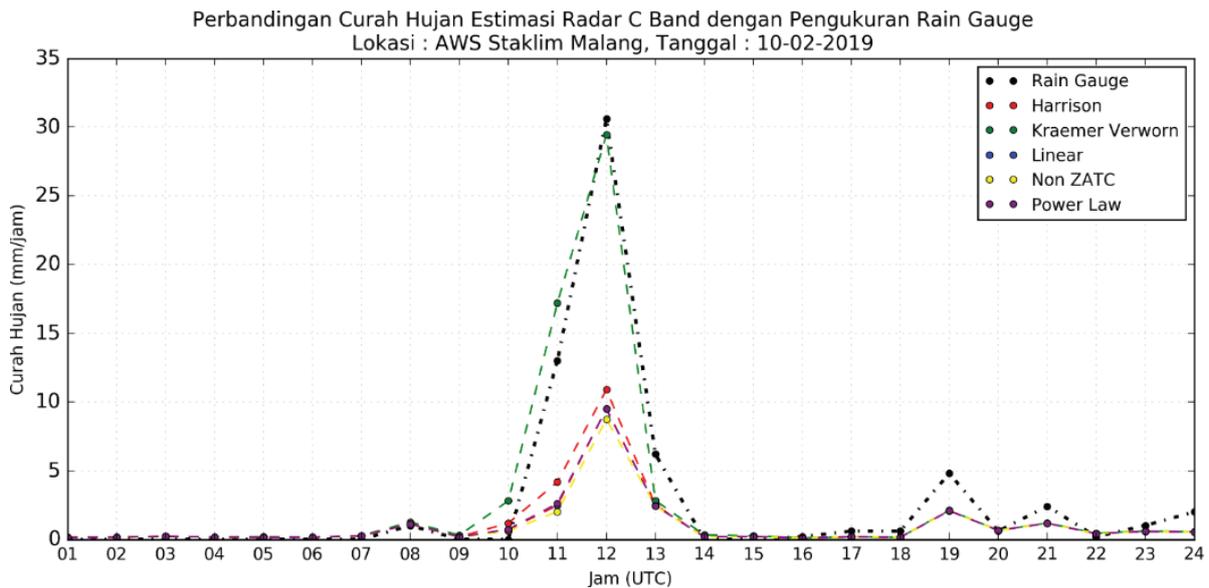


Gambar 4.

(a) Hasil *Precipitation Accumulation* (PAC) jam 12 utc (b) dengan koreksi atenuasi menggunakan nilai koefisien menurut Kramer dan Verworn tanggal 10 Februari 2019

Malang pada tanggal 10 Februari 2019, koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn menghasilkan nilai RMSE sebesar 1.446 yang merupakan nilai terkecil dibandingkan dengan perhitungan yang dihasilkan oleh koefisien menurut Battan (*linear* dan *power law*) maupun Harrison. Secara spasial estimasi curah hujan dengan koreksi atenuasi menggunakan

koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn pada tanggal 10 Februari 2019 dapat dilihat pada Gambar 4 (a) dan 4 (b), sedangkan Gambar 5 menunjukkan grafik estimasi curah hujan dari radar cuaca dibandingkan pengukuran langsung oleh *tipping bucket*.



Gambar 5.

Hasil perbandingan estimasi PAC radar cuaca dengan akumulasi pengukuran *tipping bucket* per 1 jam AWS Staklim Malang Kota Malang tanggal 10 Februari 2019

Hasil pengolahan estimasi curah hujan secara spasial berupa produk informasi *precipitation accumulation* (PAC) pada tanggal 10 Februari 2019 seperti pada Gambar 4 (a) memperlihatkan kondisi adanya gangguan (*clutter*) interferensi pada beberapa sektor pengamatan radar cuaca Stasiun Meteorologi Juanda. Produk informasi PAC jam 12.00 utc secara umum di beberapa Kabupaten/ Kota terjadi hujan dengan gradasi warna biru sampai dengan coklat muda, sedangkan khusus wilayah ARG Stasiun Klimatologi Malang, Kota Malang gradasi warna kuning dan coklat muda dengan estimasi curah hujan berkisar antara  $6.3 \text{ mm jam}^{-1}$  sampai dengan  $50 \text{ mm jam}^{-1}$  dan termasuk dalam klasifikasi intensitas curah hujan sedang sampai dengan sangat lebat, nilai reflektifitas estimasi curah hujan berkisar antara 38 - 48 dBz sampai dengan  $> 58 \text{ dBz}$ . Hasil perhitungan *surface rainfall intensity* (SRI) secara spasial pada jam pengamatan radar cuaca jam 11.20 utc dapat dilihat pada Gambar 4 (b).

Hasil pengukuran curah hujan *tipping bucket* untuk akumulasi tanggal 10 Februari 2019 jam 12.00 utc (19.00 wib) tercatat sebesar  $30.6 \text{ mm jam}^{-1}$ . Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang waktu 16.10 - 17.00 utc telah terjadi hujan dengan intensitas sangat lebat. Pelemahan energi pada pulsa radar cuaca *band C* karena terjadi hujan sangat lebat tidak hanya di wilayah sekitar AWS Stasiun Klimatologi Malang, Kota Malang tetapi sangat dimungkinkan di sepanjang arah penjalaran gelombang radar cuaca pada *beam* radar cuaca terjadi hujan dengan intensitas yang bervariasi seperti pada Gambar 4 (a) dan Gambar 4 (b) terlihat kondisi hujan di wilayah Kabupaten Pasuruan, Mojokerto hingga Kabupaten Sidoarjo.

Estimasi curah hujan dari radar cuaca saat dilakukan koreksi atenuasi dengan nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan (*linear* dan *power law*) dan Harrison untuk akumulasi jam 12.00 utc adalah sebesar  $9.506 \text{ mm jam}^{-1}$  (*linear*),  $9.489 \text{ mm jam}^{-1}$  (*power law*) dan sebesar  $10.888 \text{ mm jam}^{-1}$  (Harrison). Hasil estimasi curah hujan ketika dilakukan koreksi atenuasi dengan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer

dan Verworn sebesar  $29.44 \text{ mm jam}^{-1}$  lebih mendekati nilai hasil pengukuran curah hujan dari *tipping bucket* yang terpasang pada AWS Stasiun Klimatologi Malang, Kota Malang.

Kemampuan koreksi atenuasi masing-masing nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan (*linear* dan *power law*), Harrison serta Krämer dan Verworn yang diterapkan pada algoritma *Z-based attenuation correction* (ZATC) dibandingkan satu sama lain dalam upaya memperbaiki hasil estimasi curah hujan dari radar cuaca *band C*. Hasil pengolahan estimasi curah hujan dengan dilakukan koreksi *raw data* menghasilkan penambahan persentase keseluruhan RMSE estimasi curah hujan sebesar 29.2% pada 45 lokasi *tipping bucket* yang dihitung untuk radius 150 km dari *site* radar cuaca *band C*. Jumlah tersebut merupakan penggabungan dari empat nilai koefisien koreksi atenuasi yang berbeda. Nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari Krämer dan Verworn memiliki nilai persentase RMSE tertinggi dengan nilai sebesar 16.1% selanjutnya yaitu koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari Harrison sebesar 9.1% sedangkan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari Battan (*linear* dan *power law*) adalah masing-masing sebesar 1.7% dan 2.3%. Hasil penelitian Jacobi & Heistermann (2016) menunjukkan kesesuaian bahwa kinerja koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dari Krämer dan Verworn lebih baik melakukan koreksi atenuasi dibandingkan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Harrison.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis maka dapat disimpulkan bahwa pada proses estimasi curah hujan setelah dilakukan koreksi terhadap *raw data* reflektivitas radar cuaca *band C* menghasilkan nilai akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan hasil estimasi curah hujan sebelum diterapkan tahapan koreksi atenuasi menggunakan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Battan (*linear* dan *power law*), Harrison serta Krämer dan Verworn.

Dari semua algoritma koreksi atenuasi yang dipergunakan pada penelitian ini diketahui bahwa nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  untuk koreksi atenuasi *raw data* reflektivitas (dBz) radar cuaca yang terbaik untuk dapat

diterapkan dalam memperoleh estimasi curah hujan yang lebih akurat yaitu dengan menggunakan koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  menurut Krämer dan Verworn sementara itu hasil penambahan akurasi terendah diperoleh pada algoritma koreksi atenuasi menurut Battan (*linear*).

Saran dari penulis untuk penelitian lebih lanjut adalah sebaiknya dilakukan koreksi terhadap gangguan *clutter* selain dilakukan koreksi atenuasi karena hujan terhadap *raw data* reflektivitas radar cuaca sebelum dilakukan pengolahan data untuk memperoleh informasi estimasi curah hujan, agar diperoleh tingkat akurasi estimasi yang lebih baik maka menggunakan beberapa model relasi Z-R yang sesuai dengan karakteristik hujan pada musim hujan maupun peralihan musim (pancaroba) di wilayah tersebut.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika atas bantuannya dalam menyelesaikan penelitian ini, khususnya Pusat Pendidikan dan Pelatihan BMKG, Stasiun Meteorologi Juanda Sidoarjo serta rekan-rekan BMKG dan pihak lain yang memberikan dukungan dan bantuan untuk publikasi hasil penelitian.

### DAFTAR PUSTAKA

Atlas, D. and Ulbrich, C. W. (1977) 'Path and Area Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation 1-3 cm Band', *Journal of Applied Meteorology*, 16(12), pp. 1322-1331.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (2010) 'Press Release Kondisi Cuaca Ekstrim dan Iklim Tahun 2010 - 2011'. Jakarta, p. 53.

Bringi, V. N. *et al.* (1990) 'An Examination of Propagation Effects in Rainfall on Radar Measurements at Microwave Frequencies', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(12), pp. 829-840.

Bringi, V. N., Keenan, T. D. and Chandrasekar, V. (2001) 'Correcting C-Band Radar Reflectivity and Differential Reflectivity Data for Rain Attenuation: A Self-Consistent Method With Constraints', *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9), pp. 1906-1915.

Friedrich, K., Hagen, M. and Einfalt, T. (2006) 'A Quality Control Concept for Radar Reflectivity, Polarimetric Parameters, and Doppler Velocity', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(7), pp. 865-887.

Fukao, S. and Hamazu, K. (2014) *Radar for Meteorological and Atmospheric*. First. Tokyo, Jepang: Springer. doi: 10.1007/978-4-431-54334-3.

G. Park, S. *et al.* (2005) 'Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band . Part I: Theoretical and Empirical Basis', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(11), pp. 1621-1632.

Gabella, M. and Notarpietro, R. (2002) 'Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain', in *Proceedings of ERAD*, pp. 305-311.

Hannesen, R. and Loffler-Mang, M. (1998) 'Improvements of quantitative rain measurements with a C-band Doppler radar through consideration of orographically induced partial beam screening', *Proc. Cost 75 Seminar*, pp. 511-519.

Hardaker, P. J., Holt, A. R. and Collier, C. G. (1995) 'A melting-layer model and its use in correcting for the bright band in single-polarization radar echoes', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, pp. 495-525. doi: 551.501.81:551.574.14.

Harrison, D. L., Driscoll, S. J. and Kitchen, M. (2000) 'Improving Precipitation Estimates from Weather Radar using Quality Control and Correction

- Techniques', *Meteorological Applications*, 6, pp. 135-144.
- Hitschfeld, W. and Bordan, J. (1954) 'Errors Inherent in The Radar Measurement of Rainfall at Attenuating Wavelengths', *Journal of Meteorology*, 11(02), pp. 58-67.
- Hubbert, J. C., Dixon, M. and Ellis, S. M. (2009) 'Weather Radar Ground Clutter . Part II: Real-Time Identification and Filtering', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(7), pp. 1181-1197. doi: 10.1175/2009JTECHA1160.1.
- Jacobi, S. and Heistermann, M. (2016) 'Benchmarking attenuation correction procedures for six years of single-polarized C-band weather radar observations in South-West Germany', *Geomatics, Natural Hazard And Risk*. Taylor & Francis, 7, pp. 1785-1799. doi: 10.1080/19475705.2016.1155080.
- Kitchen, M., Brown, R. and Davies, A. G. (1994) 'Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band , range and orographic growth in widespread precipitation', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120, pp. 1231-1254. doi: 551.501.777:551.501.81:551.577.51:681.2.08.
- Krämer, S. and Verworn, H. R. (2008) 'Improved C-band radar data processing for real time control of urban drainage systems', in *11th International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh, Scotland, p. 10.
- Mori, K. (2003) *Hidrologi untuk Pengairan*. Kesembilan. Edited by S. Sosrodarsono and K. Takeda. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Munawar (2016) *Pemodelan Spasiotemporal Prediksi Curah Hujan Ekstrem Berdasarkan Integrasi Data Radar Dan Satelit Cuaca Di Provinsi Jawa Timur*. Gadjah Mada.
- Olsen, R. L., Rogers, D. V. and Hodge, D. B. (1978) 'The aRb Relation in the Calculation of Rain Attenuation', *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-26(03), pp. 318-329. doi: 0018-926X/78/0300-0318 \$00.75.
- Rauber, R. M. and Nesbitt, S. W. (2018) *Radar Meteorology*. First. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Rico-ramirez, M. A. (2012) 'Adaptive Attenuation Correction Techniques for C-Band Polarimetric Weather Radars', *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12), pp. 5061-5071. doi: 10.1109/TGRS.2012.2195228.
- Rinehart, R. E. (2004) *Radar For Meteorologists*. Fourth. Columbia, USA: Rinehart Publications.
- Skolnik, M. (2008) *Radar Hand Book*. Third. Edited by J. Walden. New York: The McGraw-Hill Companies.
- Smith, J. C. (1986) 'The Reduction of Error Caused by Bright Band in Quantitative Rainfall Measurements Made Using Radar', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3(March 1986), pp. 129-141.
- Wardoyo, E. (2015) 'Radar Meteorologi: Pengantar Analisis Citra Radar Cuaca'. Jakarta, p. 315.
- World Meteorological Organization (WMO) (2017) *WMO No. 8 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 2014th edn. Geneva, Switzerland: Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO).